

Világháborús bombakráterek automatikus térképezése

Neuberger Hajnalka – Juhász Attila

DOI: <https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.5.4>

1. Bevezetés

A II. világháború során a szembenálló felek óriási mennyiségű bombát dobtak le az ellenséges területekre. A háború befejezése óta eltelt több mint 70 év ellenére mind a mai napig komoly veszélyt jelentenek a fel nem robbant bombák, elég csak a viszonylag sűrűn előforduló ezzel kapcsolatos híradásokra gondolnunk, amikor különböző építkezéseken kerülnek elő a föld alól ezek a veszélyes objektumok. Korábbi kutatások és a szakirodalom alapján kijelenthetjük, hogy a ledobott bombák legalább 10%-a nem robbant fel (Brenner et al. 2018). 1974 óta, csak Magyarországon több, mint 5 millió darab lőszer, robbanótestet hatástalanítottak a különböző tűzszerész-szolgálatok munkatársai. Ezek döntő többsége lejárt szavatosságú lőszer volt, és csak 1-2%-nyi mennyiséget jelentettek a bombák, amelyeknek azonban kiemelt a jelentőségük a veszélyességük miatt (Linder 2008). A fel nem robbant bombák nagy része településeken belül kerül elő, ahol mai felvételek alapján sajnos nincs sok esély távérzékelési, térinformatikai módszerekkel az előzetes felderítésükre, potenciális előfordulási területeik lehatárolására. Kutatásunkban ezért mi is a külterületekre koncentráltunk. Az eljárásunk alapját a vizsgált területen végrehajtott automatikus bombakráter-detektálás jelenti, melynek eredményét bombázási és kockázati térképek előállítására használjuk fel a későbbiekben. Emellett az azonosított kráterek segítséget nyújthatnak világháborús katonai objektumok rekonstrukciójának támogatására is. Az előbbi megoldásra talán a legismertebb nemzetközi példa London bombázottsági adatbázisa (Marchionni et al. 2013). A szűkebb katonai, hadtörténeti alkalmazás mellett más területeken is felhasználható az eljárásunk, például a töbrök (Látos et al. 2016), kátyúk, égitestek természetes krátereinek térképezésére (Cohen et al. 2016).

A kockázati térképet egyfajta tematikus térképnek tekinthetjük, amelyen megjelenítjük egy vizsgált terület bombakrátereit és azok szűkebb környezetét, amelyek potenciálisan veszélyt jelenthetnek a fel nem robbant bombák miatt (Szikszai 2018). A kulcsfeladat tehát, a sokszor nagyszámú kráter megbízható azonosítása és térképezése. A nemzetközi szakirodalomban több ez irányú kutatással is találkozhatunk, amelyek archív légi fotókat használnak fel a különböző eljárásokhoz. Jellemzően neurális hálózatokkal (Brenner et al. 2018), illetve az úgynevezett „marked point process” eljárással történő megvalósításokat publikáltak (Kruse et al. 2017). Ezzel szemben – a fényképek felhasználásának komoly nehézségeit is figyelembe véve –, mi légi lézerszkennelt adatokat használtunk fel a kutatásainkban. Ezek egy része a németországi OpenNRW-projektből származik, melyben Észak-Rajna-Vesztfália területéről nagy mennyiségű és változatos térbeli adatokat tettek ingyenesen elérhetővé (Isenburg 2017). A két mintaterület: Emmerich am Rhein 146 km² területtel, valamint Rheine 186 km² kiterjedéssel. A salzgitteri adatokat, amelyek 281 km²-es területet fednek le, a hannoveri Leibniz Egyetem Fotogrammetria és Térinformatikai Intézetétől kaptuk meg.

A LiDAR-adatokon alapuló vizsgálatoknak számos előnye van az archív légi felvételekkel szemben:

- nem jelentkezik a felhőzet és a terepi objektumok által okozott kitakarás és árnyékolás,
- a sokszor nagyon rossz minőségű részleteket is tartalmazó archív légi felvételekkel szemben homogénnek tekinthető nagy sűrűségű pontfelhővel dolgozhatunk,
- közvetlenül kinyerhető egy nagy pontosságú terepmodell a pontfelhőből, akár vegetációval borított területeken is, aminek esetünkben kiemelt jelentősége van.

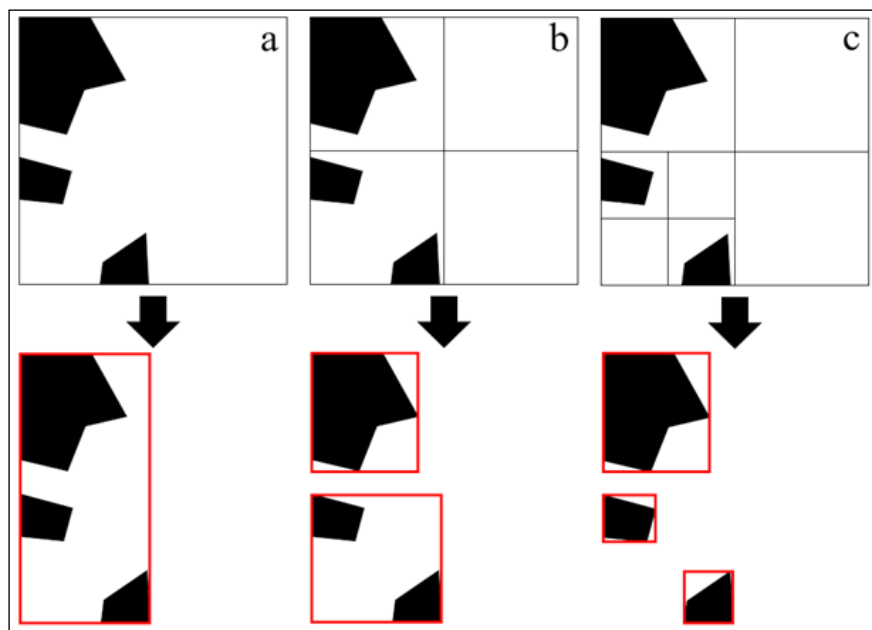
Természetesen a hátrányokról sem feledkezhetünk meg, amelyek közül a

legjelentősebb a felvétel készítésének időpontja, a lézerszkennelt állományok a mai állapotról szolgáltatnak információt. Mivel a légi felvételek a háború alatt, illetve közvetlenül utána készültek, nyilvánvalóan teljesebb képet adnak a bombázottságról. Kihívást jelent továbbá, hogy a legtöbb képfeldolgozó eljárás valódi képekre van kidolgozva, így ezek használata terepmodelleken több esetben is módosításokat igényel.

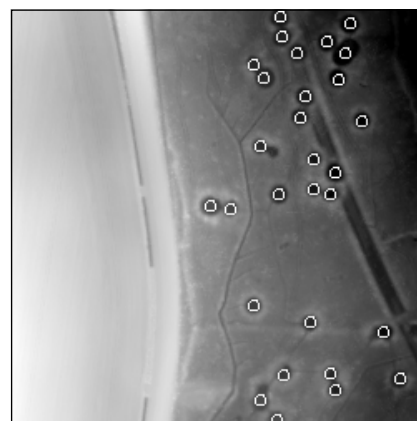
2. A kockázati térképezést megalapozó eljárás

A bombázási és kockázati térképek alapjául egy olyan eljárást fejlesztettünk ki, ami lehetővé teszi nagy területek átfogó vizsgálatát, és minimális felhasználói beavatkozást igényel. Az eljárás fontosabb lépéseit és az ezeket befolyásoló tényezőket az alábbiakban tekintjük át.

Elsőként, – figyelembe véve azt a lehetőséget is, hogy akár országos területi kiterjedésű vizsgálatra is sor kerülhet – kidolgoztunk egy módszert a potenciálisan feldolgozandó területek hatékony leválogatására, ami nagyban csökkenti a kutatómunka idő- és erőforrásigényét. A korábbi tapasztalatok azt mutatják, hogy az elmúlt évtizedek során szinte kizárólag erdős, fás, ligetes területeken maradtak fenn szignifikáns nyomai a bombázásoknak. Ebből kiindulva a területi leválogatás alapjául az OSM (OpenStreetMap) térképi adatai közül az erdőfedvényt használtuk fel. A módszer lényegében szabályos négyzetláncokra bontja a területet, majd megvizsgálja az erdők részarányát az egyes rácsoiban. Ha a részarány egy bizonyos határérték alatt van, akkor további, kisebb rácselemek következnek. Így egy adaptív eljárást kapunk, amely folyamatosan zárja ki a vizsgálatból a hasznos információt nem tartalmazó „üres” terület egységeket, valamint a megtartott rácselemek esetében a minél nagyobb potenciális vizsgálati területarányra törekszik



1. ábra. Potenciális területleválogató eljárás lépései és eredményeik
a) teljes terület, b) terület felosztása négy részre, c) szükség szerint az egyes területek továbbosztása)



2. ábra. A bombakráterek azonosítása a salzgitteri mintaterületen: 33 db referenciakráterből 30 db azonosított, 3 nem azonosított, téves azonosítás nélkül

szűrők alkalmazása, végül a törlés megismétlése (Neuberger et al. 2017). Az így elért eredményeket tovább javítottuk a potenciálisan kráterként azonosított pixelhalmazok körszerűségének vizsgálatával, az alábbi képlet felhasználásával (Mallick 2015). Szabályos kör esetén ez az érték maximum 1 lehet.

Az esetlegesen átfedő kráterek azonosításához a „Distance transform” megoldást alkalmaztuk (Distance Transform Documentation 2017). Az eljárás minden pixel esetén kiszámolja, hogy mi a legkisebb távolság az objektum széléhez viszonyítva, bináris képeken. Így az objektum súlypontjában a legnagyobb, a körvonalat az egyes érték jelzi, ha pedig nem az objektum része egy pixel, akkor a nulla értéket vesz fel.

A leírt eljárást alkalmazva több mintaterületen is jó eredményeket értünk el. (1. táblázat). Az egyes területeken a referenciakráterek számát manuálisan, tapasztalatainkra támaszkodva határoztuk meg. Az algoritmus paraméterei az első területre lettek optimalizálva (2. ábra), nagy valószínűséggel a 2. és 3. területek esetében is jobb eredmények érhetők el a paraméterek területspecifikus definiálásával.

3. A kockázati térkép elkészítése

A kockázati térkép alapvető funkciója, hogy tájékoztassa a felhasználót az ábrázolt területen lévő különböző mértékű veszélyességi értékekkel rendelkező részterületek térbeli

A kráterdetektálás eredményei a mintaterületeken

1. táblázat.

	Kráter-szám (ref)	Valós találat	Téves találat	Teljesség (%)	Helyesség (%)	Minőség (%)
Salzgitter	33	30	0	90,9	100,0	90,9
Rheine 1	56	35	5	62,5	87,5	57,4
Rheine 2	37	27	21	73,0	56,2	46,6

$Teljesség = \text{Valós találat} / \text{Referenciakráterek száma}$

$Helyesség = \text{Valós találat} / (\text{Valós} + \text{Téves találatok})$

$Minőség = \text{Valós találat} / (\text{Referencia kráterek} + \text{Téves találatok})$

(1. ábra). Az esetlegesen előforduló – méretükből adódóan – nem releváns, kis erdőrészek törlése után előállnak azok a maszkok, amelyek segítségével az eredeti LiDAR-állományból kimetszhetjük a további vizsgálatok alapját képező pontfelhőrészleteket (Juhász – Neuberger 2018).

A leválogatott területekre eső állományok nagysága még így is jelentősnek tekinthető, ezért a következő lépést a LiDAR-pontfelhő méretének radikális csökkentése jelentette. A cél az volt, hogy a célobjektumok és a terep jellegzetes pontjai megmaradjanak, de a kutatás szempontjából irreleváns pontokat minél nagyobb számban elimináljuk. A kutatás során több módszert is teszteltünk, kerülve a szabályos ritkítási eljárásokat, amelyeket ez esetben nem tartunk megfelelőnek. Tapasztalataink szerint az az eljárás vezetett a legjobb eredményre, amely egy vizsgált pont 1 m²-es körzetében csak azokat a pontokat tartja

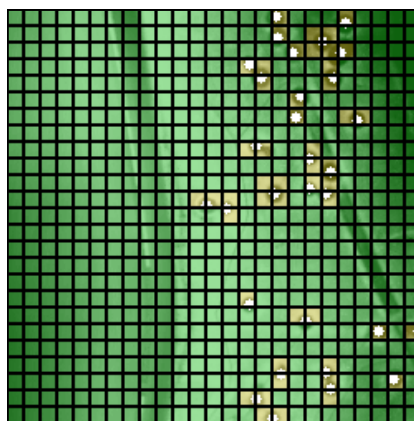
meg, amelyek magassága egy bizonyos küszöbértéknél nagyobb mértékben eltér ettől a kiválasztott ponttól. A küszöbérték növelésével a pontfelhő mérete jelentősen csökkenthető. Esetünkben 10-20%-ra redukálható a pontfelhő mérete, de egy minimálisan megadott pontszám alá (ami akár az egyetlen vizsgált pont is lehet) nem kerülhetünk (Neuberger-Juhász 2016).

Az így rendelkezésre álló, előfeldolgozott adatok képezték az alapját a harmadik lépésnek, ami a kráterdetektálási eljárás. Ez a módszer digitális képfeldolgozási műveleteket hajt végre meghatározott sorrendben a LiDAR-adatokból levezetett raszteralapú digitális terepmodellen (DTM). A műveletek sorrendben a következők: trendfelület generálása simításokkal, különbségkép képzése az eredeti és a trendfelületből, küszöbölés, irrelevánsan kicsi és nagy pixelfoltok törlése, morfológiai

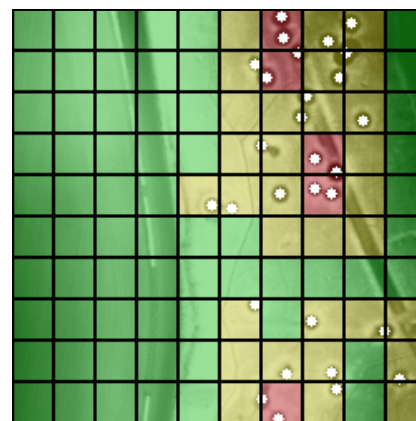
eloszlásáról. A korábban már említett külföldi kutatócsoportok több különböző eljárást is alkalmaztak a kockázati térképek generálására (Kruse et al. 2018). Figyelembe véve a későbbi, potenciális felhasználók igényeit és gyakorlatát, mi a szabályos négyzög-rács alapú térképezés mellett döntöttünk. A régészetben, roncskutatásban, illetve a tűzserzési gyakorlatban is döntően a szabályos négyzet vagy téglalap felosztást használják a terepi munkákban. A tematikát tekintve, alapvetően három (veszélyességi) osztályt különböztettünk meg, amelyeket eltérő színekkel jelöltünk (3. ábra).

- Piros színnel jelöltük a legkockázatosabb területeket, ahol az adott területre több, mint egy kráter esik. Egy esetleges terepi vizsgálat során mindenképpen ezekkel a területekkel célszerű kezdeni a bombamentesítést.
- Sárgával azokat a potenciális területeket jelöltük, amelyeket pontosan egy kráter volt található. Emellett biztonsági megfontolások miatt, a piros területek szomszédjai is sárga színt kaptak. Továbbá, ha egy sárga egység szélén (pl. 10 méteres pufferben) helyezkedett el egy detektált kráter, akkor ebben az esetben is sárga színt kapott a szomszédos terület is.
- A krátermentes részek zöldek.

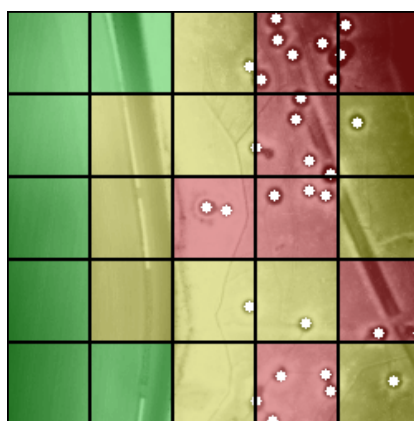
A kockázati térkép elkészítésének másik fontos paramétere volt a megfelelő felbontás. Mindhárom mintaterületen több felbontás is teszteltünk 10 métertől 100 méterig (3. ábra), (2. táblázat), melyek közül az 50 méterest ítéltük a legcélravezetőbbnek. A kisebb méret ellen szól, hogy azokban a felbontásokban szinte csak a bombakráterek reprezentálták a legveszélyesebb terület egységeket (a méretük miatt) nagyon szétagoltan, és csak a nagyon szűk környezetük a még potenciálisan vizsgálendő (sárga) területeket (3. ábra a) része). Emellett, a kisebb méretű rácselemek esetében olyan „biztonságos” folyosók keletkezhetnek a térképen, amelyek véleményünk szerint nem életszerűek, nem hagyhatók ki a gyakorlati bombakeresésből (3. ábra). 100 méteres felbontás esetében (3. ábra d) része) viszont már relatíve nagy, veszélyesnek ítélt területek álltak



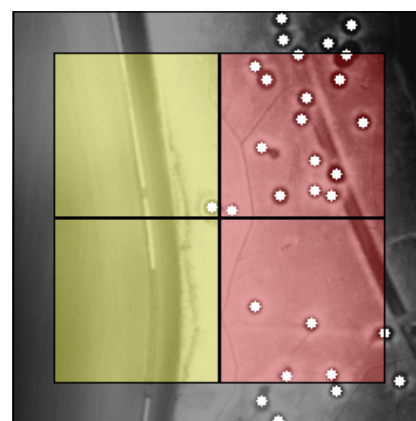
3. a) ábra. 10 m-es felbontás (Salzgitter)



3. b) ábra. 25 m-es felbontás (Salzgitter)



3. c) ábra. 50 m-es felbontás (Salzgitter)



3. d) ábra. 100 m-es felbontás (Salzgitter)

elő, ami fokozott biztonsági szempontból akár indokolt is lehet. Azonban ez jóval nagyobb költséget is jelent, tekintettel a bombakeresés gyakorlati megvalósítása. Természetesen igény esetén eltérő felbontású kockázati térképek előállítására is van mód a különböző – lokálistól a regionális, országos – szintig terjedő céloknak megfelelően. Emellett a beazonosított kráterek alapján pufferzónák is generálhatók térinformatikai alkalmazásokban.

A tesztek során kezelni kellett azokat az eseteket is, amikor a kiválasztott kockázati térképi rácselem nagysága nem volt kompatibilis az adott szelvények méretével. A Salzgitter terület egy 250 × 250 m-es kivágat, ahol a 100 m-es felbontású kockázati térkép

elkészítése értelemszerűen nehézsegekbe ütközik. Az algoritmusunk azonban bármilyen méretű szelvény és felbontás kombinációját képes kezelni, néhány megkötéssel:

- A kockázati térkép minimális felbontása a szelvény nagyságával egyezik meg. Például, ha egy 500 m-es felbontás szeretnénk egy 250 × 250-es területen, akkor a felbontás 250-re fog változni, automatikusan.
- Természetesen a felbontás nem lehet negatív, azonban felhasználói hibák előfordulhatnak. Ekkor a program figyelmeztet erre, és kéri a valós felbontást.
- A 3. ábra d) részének megfelelően, ha a szelvény területe nem osztható maradéktalanul a felbontással,

A különböző veszélyességű területek részaránya a felbontás tekintetében

2. táblázat.

	10 m-es felbontás		25 m-es felbontás		50 m-es felbontás		100 m-es felbontás	
	Piros %	Sárga %	Piros %	Sárga %	Piros %	Sárga %	Piros %	Sárga %
Salzgitter	0	15	5	37	28	44	50	50
Rheine 1.	0	8	1	25	15	45	50	50
Rheine 2.	0	3	0	11	4	35	28	53

akkor a szelvény közepén zajlik a vizsgálat, a széleket arányosan kihagyva. Ezek a részek amúgy is bizonytalanok, hiszen a szomszédos szelvényeken levő veszélyes területek is hatással lehetnek rájuk. A kapcsolódó szelvények együttes vizsgálata további kutatás részét képezi.

A programot teljesen egészében C++ nyelven írtuk; a munkánk során csupán szabadon hozzáférhető OpenCV (OpenCV 2018) függvényeket használtunk fel. Eredményül egy olyan szoftvert állítottunk elő, mely egy átlagos asztali számítógépen néhány másodperc alatt (a sebesség főként a számítógép paramétereitől, illetve a feldolgozandó terület nagyságától függ) tetszőleges terepmodellen megtalálja a bombakrátereket, és abból kimenetként egy kockázati térképet állít elő.

4. Összefoglalás, kitekintés

A kidolgozott, automatikusnak tekinthető módszer alkalmas nagy területeken történő bombakráter-azonosításra és ezek alapján bombázottsági és kockázati térképek elkészítésére. Az algoritmus egyes lépéseiben használt paraméterek optimalizálásakor figyelembe kell venni a vizsgált terület nagyságát, a felbontást, a kutató objektumok jellemző méreteit, az azokat nagy tapasztalatot igényel. Reményeink szerint előbb-utóbb sor kerülhet országos szintű magyarországi adatok feldolgozására is, melynek eredményeképpen egy átfogó kockázati elemzés készülhet. Eredményeink felhasználhatók egy-egy nagyobb terület bombamentesítésének idő- és költségkalkulációjához is.

A fentiekben bemutatott, speciálisnak tekinthető alkalmazási terület mellett az eljárás, vagy annak egyes alkotóelemei, felhasználhatók minden olyan területen ahol pontfelhők feladat-specifikus leválogatása, ritkítása, illetve lokálisan előforduló magasságkülönbségek detektálása a feladat. Ilyen lehet a karsztos területeken megfigyelhető töbrök azonosítása, égitestek krátereinek térképezése, vagy akár útállapot felmérésének

támogatása a kátyúk detektálásával, és a rossz minőségű utak kockázati térképezésével.

Irodalom

- Brenner, S. – Zambanini, S. – Sablatnig, R. 2018. Detection of Bomb Craters in WWII Aerial Images. *Proceedings of the OAGM Workshop 2018*, pp. 94–97. DOI: [10.3217/978-3-85125-603-1-20](https://doi.org/10.3217/978-3-85125-603-1-20)
- Cohen, J. P. – Lo, H. Z. – Lu, T. – Ding, W. 2016. Crater Detection via Convolutional Neural Networks. *47th Lunar and Planetary Science Conference (LPSC 2016)*, pp. 1–2.
- Distance Transform Documentation. 2017. OpenCV: Image Segmentation with Distance Transform and Watershed Algorithm. https://docs.opencv.org/3.3.0/d2/dbd/tutorial_distance_transform.html, utolsó elérés: 2018. 8. 14.
- Isenburg, M. 2017. First Open LiDAR in Germany | rapidlasso GmbH. <https://rapidlasso.com/2017/01/03/first-open-lidar-in-germany/>, utolsó elérés: 2017. 10. 13.
- Juhász, A. – Neuberger, H. 2018. Automatic selection of potential WWII bombed areas by using spatial data. *Pollack Periodica*, 13. évf. pp. 173–183. DOI: [10.1556/606.2018.13.2.17](https://doi.org/10.1556/606.2018.13.2.17)
- Kruse, C. – Neuberger, H. – Rottensteiner, F. – Hoberg, T. – Ziem, M. – Huth, J. – Heipke, C. 2017. Automatische Detektion von Bombenkratern in Kriegsluftbildern mittels markierter Punktprozesse. *37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Würzburg*, pp. 245–261.
- Kruse, C. – Rottensteiner, F. – Hoberg, T. – Ziem, M. – Rebke, J. – Heipke, C. 2018. Generating impact maps from automatically detected bomb craters in aerial wartime images using marked point processes. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV. évf. pp. 127–134. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-3-127-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-127-2018)
- Látos, T. – Telbisz, T. – Deák, M. – Székely, B. – Koma, Z. – Standovár, T. 2016. LiDAR és topográfiai térkép alapú digitális terepmodellekből levezetett, illetve kézzel digitalizált töbrök-vonalak morfometriai összehasonlítása az Aggteleki-karszt példáján. *Karsztfejlesztés XX.*, pp. 145–165.
- Linder 2008. Fel nem robbant bombák – A hibahatáron belül. http://magyarnarancs.hu/tudomany/fel_nem_robbant_bombak_a_hibahataron_belul-68929, utolsó elérés: 2018. 7. 12.
- Mallick, S. 2015. Blob Detection Using OpenCV (Python, C++) | Learn OpenCV. <https://www.learnopencv.com/blob-detection-using-opencv-python-c/>, utolsó elérés: 2018. 8. 14.
- Marchionni, P. – Findlay, P. – Dunning, A. – Southall, H. – Heally, R. – Aucott, P. – Ladd, B. – Brown, M. 2013. Bomb Sight - Mapping the World War 2 London Blitz Bomb Census. <http://www.bombsight.org/>, utolsó elérés: 2018. 7. 5.
- Neuberger, H. – Juhász, A. 2016. Objektum detektálás LiDAR adatokból a pontsűrűség függvényében. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII.*, Debrecen, pp. 345–352.

- Neuberger, H. – Juhász, A. – Kruse, C. 2017. Automatic detection of World War II objects based on air-borne LiDAR data. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VIII.*, Debrecen, pp. 259–265.
- OpenCV. 2018. OpenCV library. <https://opencv.org/>, utolsó elérés: 2018. 8. 14.
- Szikszai, C. 2018. Magyarország II. világháborús bombázottsági adatbázisának tervezése. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IX.*, Debrecen, pp. 341–347.

Summary

After more than 70 years the remained unexploded bombs of the World War II still pose a serious threat. In this paper a method is presented about how can be the bomb craters detected and mapped from LiDAR data in an automatic way. Firstly, the potential areas must be delineated, where the bomb craters can be found. Secondly, the huge amount of data must be reduced considering the time and resource needs of the research. Digital terrain model can be generated from LiDAR data easily and the craters can be found by analyzing the local height differences. The output of this process is a risk map, which can help to prioritize the most dangerous areas.

Kulcsszavak: bombakráter, kockázati térkép, LIDAR, automatikus térképezés

Keywords: bomb crater, risk map, LIDAR, automated mapping



Neuberger Hajnalka
doktorjelölt

BME Fotogrammetria és
Térinformatika Tanszék
neuberger.hajnalka@epito.bme.hu



Dr. Juhász Attila
adjunktus

BME Fotogrammetria és
Térinformatika Tanszék
juhasz.attila@epito.bme.hu